

И. И. Антипова-Каратаева,
Ю. И. Стахеев,
К. П. Флоренский

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГОЛИТА ИЗ МОРЯ ИЗОБИЛИЯ, МОРЯ СПОКОЙСТВИЯ И ОКЕАНА БУРЬ

Представлены результаты исследований спектров диффузного отражения реголита, доставленного автоматической станцией «Луна-16» и миссиями «Аполлон-11» и «Аполлон-12», индикатрис рассеяния и спектров зеркального отражения реголита из Моря Изобилия, а также спектров диффузного отражения от шлифов лунных пород из Моря Спокойствия и Океана Бурь. Спектры диффузного отражения исследованных образцов не имеют ясно выраженной структуры и близки друг к другу. Наиболее низкой отражательной способностью обладает реголит из Моря Спокойствия, наибольшей — из Океана Бурь. В спектрах заметна слабая полоса поглощения с максимумом вблизи 1 нм, соответствующая иону Fe^{2+} в октаэдрическом положении в решетке минералов-компонентов реголита. Ее положение и интенсивность различны в спектрах разных образцов, что обусловлено их разным минералогическим составом. При регистрации индикатрис рассеяния реголита обнаружена зеркальная компонента, спектр которой несколько отличается от спектра диффузного отражения. Это отличие объясняет, по-видимому, визуально наблюдаемое изменение оттенков реголита от бурого до зеленоватого при его освещении и наблюдении под различными углами.

Исследованиям подвергались пробы реголита, доставленного автоматической станцией «Луна-16». Образцы отбирались из зоны А, т. е. с глубины 0—8 см от поверхности [1]. Они представляют собой тонкозернистый порошок с низким суммарным коэффициентом отражения. Размер частиц варьирует от 2 до 1500 мкм, и средний медианный размер их равен 60 мкм. При морфологическом изучении установлено, что по крайней мере половина всех частиц оплавлена или оплакована с поверхности. При этом встречается как шлакообразное пузыристое оплавление, так и гладкое глазурное остекловывание. Более 1% частиц представлено стеклянными шариками. Измерениям подвергалась как проба в целом, так и ее отдельные

фракции по размерам частиц: —83; +83 —127; +127 —200 и +200 —450 мкм.

Исследовались также образцы реголита, доставленного «Аполлоном-11». Образец 10005, 34-5 был взят из колонки с глубины 1,5 см, образец 10005,35 отбирался с глубины 10—11 см.

Образцы реголита, доставленного «Аполлоном-12», также представляли собой пробы из буровой колонки. Образец 12028, 229 располагался в 16 см от поверхности, а образец 12028,233 — на глубине 33 см.

Спектры диффузного отражения образцов регистрировались спектрофотометром EPS-3Т фирмы Хитачи с интегрирующей сферой относительно стандарта-пластинки, напыленной окисью магния. Интервал длин волн: 220—1800 нм.

Индикатрисы рассеяния света исследовались на фотометре, обеспечивавшем измерения отраженного света в интервале углов 0—80° по обе стороны от нормали к образцу. Угол падения света фиксировался в пределах 0—80°. Минимальный фазовый угол равнялся 22°. Образец освещался точечной вольфрамовой, иодной или дейтериевой лампами. Монохроматизация отраженного света осуществлялась монохроматором с дифракционной решеткой по Фасти, за выходной щелью устанавливался фотоумножитель 1 Р 28. Освещение образца и регистрация отраженного света производилась без конденсорных систем.

Спектры диффузного отражения всех измеренных образцов не имеют ясно выраженной структуры и очень близки друг к другу. Наблюдается медленное увеличение альбеда в интервале длин волн 250—1800 нм (рис. 1), причем его средние значения для реголита из Моря Изобилия (спектр 4) равны: для области 260—400 нм — 0,086; 400—750 нм — 0,107; 750—950 нм — 0,126 и 950—1800 нм — 0,128 [2]. В области 0,8—1 мкм в спектрах всех образцов

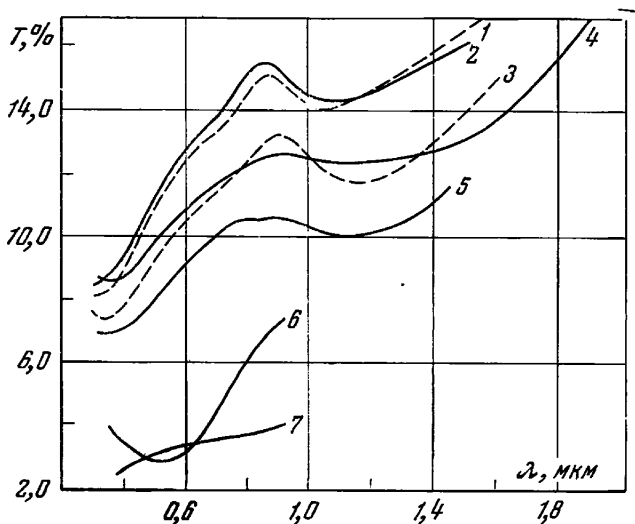
наблюдается широкая полоса поглощения, которая отождествляется с $d-d$ переходом в ионе Fe^{2+} , входящем в кристаллическую решетку минералов-компонентов реголита. По данным химического анализа, содержание железа в образце, доставленном «Луной-16» равно 13,1% [1].

Наиболее низкой отражательной способностью обладает реголит из Моря Спокойствия (спектры 3 и 5, рис. 1), а наибольшей — реголит из Океана Бурь (спектры 1 и 2, рис. 1). Разница в спектрах образцов, отобранных с различных глубин, но из одной и той же буровой колонки, во всех случаях невелика, она не превышает 2% во всем исследованном интервале длин волн. Тем не менее отражательная способность реголита явно увеличивается по направлению от поверхности к глубине

Моря Спокойствия и Океана Бурь. Он имеет наименее ярко выраженную структуру, приближаясь по характеру к спектру реголита из поверхностного слоя Моря Спокойствия.

Полученные нами экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с данными по измерению спектров диффузного отражения других образцов реголита [3—7]. Численное значение зарегистрированного альбеда для образцов из Моря Изобилия несколько выше, чем альбеда Луны в целом. Однако телескопические данные, полученные для области Моря Изобилия, практически совпадают с данными прямых измерений.

Для более подробного анализа спектров диффузного отражения реголита из разных районов Луны были зарегистрированы спектры четырех шлифов образцов лунных пород, достав-

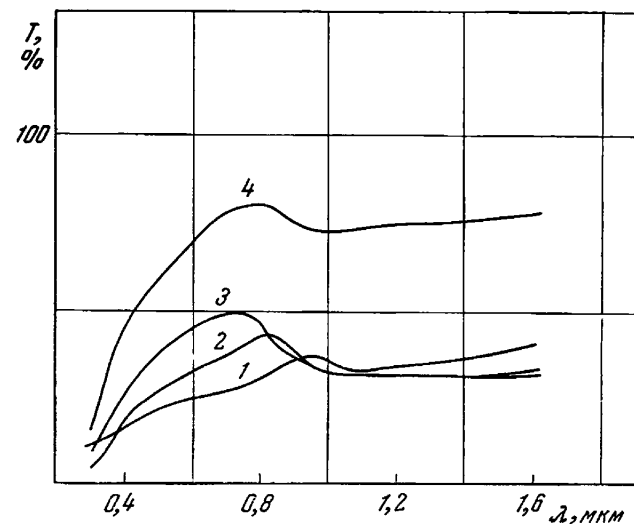


Р и с. 1. Спектры диффузного отражения реголита из различных районов Луны

1 — обр. 12028,229; 2 — обр. 12028,233; 3 — обр. 10005,35; 4 — обр. Л-16-А; 5 — обр. 10005,34-5; 6 — спектр зеркального отражения обр. Л-16-А; угол падения света 60° ; коэффициент отражения в произвольных единицах; 7 — приведенный спектр диффузного отражения обр. Л-16-А; коэффициент отражения при 0,5 мкм равен коэффициенту зеркального отражения

Р и с. 2. Спектры диффузного отражения шлифов лунных горных пород

1 — брекчия, обр. 10048,53; 2 — крупнозернистый базальт, обр. 10047,25; 3 — мелкозернистый базальт, обр. 12018,80; 4 — брекчия, обр. 12034,34



ленных «Аполлоном-11» (10047,25 и 10048,53) и «Аполлоном-12» (12034,34 и 12018,80). Спектры регистрировались в тех же условиях, что и спектры реголита.

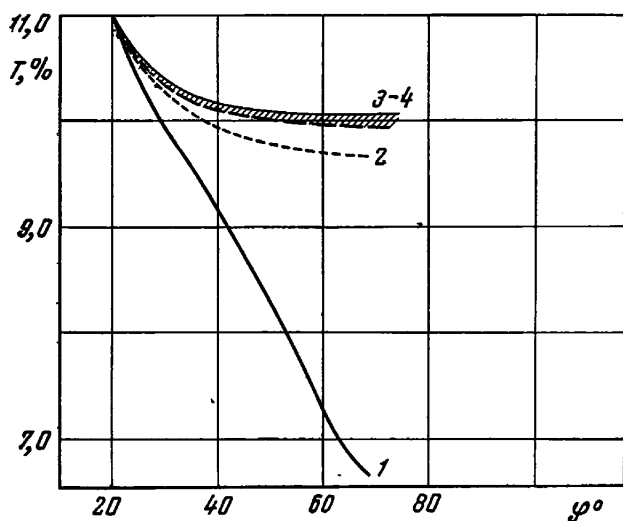
Наблюдается достаточное сходство общего характера спектров исследованных образцов реголита и шлифов (рис. 2): увеличение интенсивности отраженного света с ростом длины волны и присутствие полосы поглощения в области около 1 мкм. Однако интенсивность спектров всех шлифов значительно выше, полоса поглощения двухвалентного железа выражена более четко, а различие между образцами шлифов из разных районов Луны по спектрам меньше, чем между образцами реголита. Так, спектры диффузного отражения шлифов 10048,53, 10047,25 и 12018,80 сходны друг с другом, особенно в области 0,8—1,8 мкм, а

(спектры 2 и 1, спектры 3 и 5, рис. 1). Спектр диффузного отражения реголита из Моря Изобилия (спектр 4, рис. 1) по интегральному коэффициенту отражения занимает промежуточное положение между спектрами реголита из

спектр образца 12034,34 заметно отличается от них. Кроме того, зависимость интенсивности света, диффузно отраженного от шлифов, от длины волны в области 250—800 $\mu\text{м}$ выражена гораздо сильнее, чем в спектрах реголита, а в более длинноволновой области (0,8—1,8 $\mu\text{м}$) эта зависимость становится заметно более слабой.

Все указанные свойства заметно отличают спектры шлифов от спектров реголита.

Для образцов из Моря Изобилия были проведены исследования характеристик рассеяния света. Регистрация индикатрис рассеяния, сводившаяся к измерениям интенсивности света под различными углами, производилась при фиксированном положении источника света, а именно, при нормальном падении света и при углах между нормалью к поверхности образца



Р и с. 3. Индикатрисы рассеяния для нормального падения света
 φ — фазовый угол; T — в условных единицах, приведен к одному значению для $\varphi = 22^\circ$; 1 — длина волны 0,4 $\mu\text{м}$; 2 — длина волны 0,436 $\mu\text{м}$; 3—4 — длина волны 0,6—0,9 $\mu\text{м}$

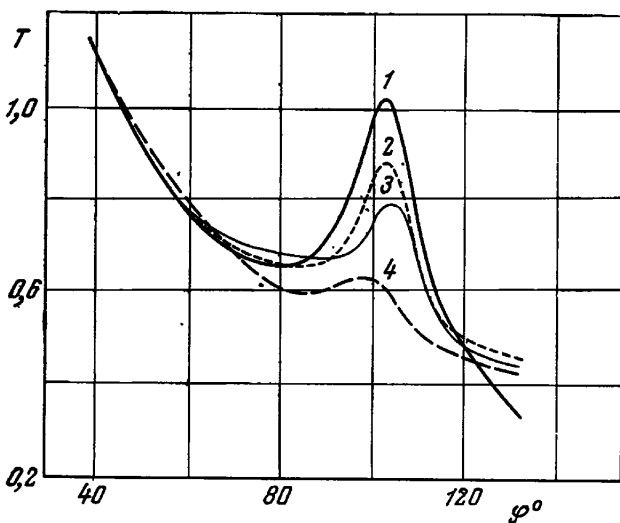
Р и с. 4. Индикатрисы рассеяния для угла падения света 40°
 φ — фазовый угол; T — в относительных единицах, во всех случаях приведен к одинаковой величине при $\varphi = 22^\circ$; 1 — длина волны 0,33 $\mu\text{м}$; 2 — длина волны 0,40 $\mu\text{м}$; 3 — длина волны 0,60 $\mu\text{м}$; 4 — длина волны 0,80 $\mu\text{м}$

и направлением падающего света, равных 20, 30, 40 и 60° .

При нормальном падении света на образец наблюдается быстрый рост интенсивности отраженного света с уменьшением фазового угла (рис. 3). Это соответствует данным по рассеянию света поверхностью Луны, а также данным, полученным для образцов из Моря Спо-

койствия [8]. Крутизна кривой несколько меняется с длиной волны падающего света: с уменьшением длины волны наблюдается более быстрый рост интенсивности отраженного света, причем различия в крутизне кривой становятся более заметными при фазовых углах меньше 50° .

При освещении образцов под другими углами характер индикатрисы несколько меняется. Кроме увеличения интенсивности отраженного света, с уменьшением фазового угла наблюдается возникновение малоинтенсивного максимума отраженного света в области фазовых углов, соответствующих зеркальному отражению света источника от исследуемого образца. Максимум зеркального отражения становится заметным при углах падения света, превышающих 30° .



При меньших углах зеркально отраженную компоненту не удалось обнаружить на фоне рассеянного света, по-видимому, из-за ее малой интенсивности. Относительная интенсивность зеркальной компоненты заметным образом зависит от длины волны падающего света, уменьшаясь с ее ростом. Типичные индикатрисы рассеяния для различных участков спектра и для угла падения света, равного 40° , приведены на рис. 4. В интервале длин волн 330—950 $\mu\text{м}$ относительная интенсивность зеркальной компоненты уменьшается примерно в 5 раз.

Как видно из рис. 4, интервал углов, при которых регистрируется зеркальная компонента, равен примерно 40° , т. е. полуширина эффекта равна 20° . При этом максимальная интенсивность несколько смещена в сторону больших углов по отношению положения точного зер-

кального отражения. При замене образца зеркалом регистрируется эффект, имеющий угловую полуширину $2,5^\circ$, под углом, точно равным углу падения света.

Возникновение максимума зеркального отражения на фоне индикатрисы рассеяния было зарегистрировано для образцов реголита из Моря Изобилия, отличающихся размером частиц. Этот эффект оказался хорошо выраженным для образцов, состоящих из частиц с размерами в интервале $+83 - 127$ мкм, причем поверхность образца при измерениях была шероховатой (образована свободной засыпкой в кювету).

При сглаживании поверхности интенсивность зеркальной компоненты заметно возросла (сглаживание производилось путем прижима стеклянной пластинки к поверхности образца), а интервал углов, при которых она наблюдалась, суживался.

Присутствие максимума отражения зеркальной компоненты на индикатрисе рассеяния является, по-видимому, специфической особенностью образцов лунного грунта, и причиной его появления, видимо, является видоизменение поверхностей частиц реголита под действием вторичных процессов, специфичных для Луны. Аналогичный эффект для порошков земных горных пород и метеоритов не отмечался в литературе и не регистрировался нами. Измерения индикатрис рассеяния ряда порошков базальтов, дунитов, габбро-диабазы и каменных метеоритов, произведенные на той же установке, дали результаты, совпадающие с литературными данными [9]. Полученные индикатрисы показывают, что интенсивность отраженного света сильно растет с уменьшением фазового угла, коэффициенты отражения всех исследованных образцов значительно выше коэффициента отражения образцов, доставленных «Луной-16».

Зеркальная компонента, определенная для образцов земного происхождения с шероховатой поверхностью, а также для образца хондрита Ефремовка, не проявляется даже при углах падения света больше 60° . Сильное сглаживание поверхности образцов (притирание полированной стеклянной пластинкой) приводит к появлению очень слабого зеркального эффекта.

Угловая полуширина эффекта зеркального отражения при этом более 30° , и интенсивность ее очень мала.

Наличие зеркального отражения (наряду с диффузным, характерным для порошков горных пород) от образцов лунного грунта, видимо, обусловлено особенностями морфологии поверхностей частиц вторичного происхождения. Их характерным свойством является наличие остеклованных поверхностей у 40% частиц крупнее 450 мкм [1] и большого числа стеклянных шариков в мелкозернистых фракциях.

Некоторая часть таких частиц может быть сориентирована таким образом, что на поверхности образца возникают зеркальные площадки. Это соображение подтверждается и визуальным наблюдением порошка реголита, когда отмечается характерный блеск, отличающий его от имитирующих порошков горных пород земного происхождения.

Нами был измерен спектр отражения зеркальной компоненты в интервале длин волн $0,35 - 0,90$ мкм (спектр *б* на рис. 1). Этот спектр несколько отличается от спектров диффузного отражения исследованных образцов. Основные особенности его, а именно, бесструктурность и монотонное увеличение коэффициента отражения с ростом длины волны, сохраняются и в этом случае. Однако коэффициент отражения в спектре зеркальной компоненты, начиная с длины волны примерно $0,6$ мкм, растет значительно быстрее, чем в спектре диффузной компоненты, а в области $0,5 - 0,6$ мкм он несколько ниже.

Возможно, это различие в спектрах диффузной и зеркальной компонент отражения объясняет неоднократно отмеченную разницу в оттенках цвета реголита, который оценивался разными наблюдателями то как бурый, то как зеленоватый. По-видимому, это вызывалось различиями в условиях освещения и наблюдения, тем более, что эти различия отмечены в области максимальной чувствительности глаза $500 - 600$ нм.

Указанные выше эффекты, проявившиеся при исследовании оптических характеристик реголита, отличают его по этим параметрам от земных горных пород. Это важно, особенно принимая во внимание тот факт, что они зачастую близки по химическому составу. Не исключено, что эти эффекты в дальнейшем удастся использовать при телескопических наблюдениях для определения относительных содержаний частиц первичного и вторичного происхождения или степени воздействия на различные участки Луны вторичных процессов.

Литература

1. Виноградов А. П. Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией «Луна-16».— *Геохимия*, 1971, № 3, 261.
2. Антипова-Каратаева И. И., Стахеев Ю. И., Флоренский К. П. The optical parameters of Mare Fecunditatis Regolith.— *Space Research XII, Life Science and Space Research X, Paper 19*, 1971.
3. Hapke B. W., Cassidy W. A., Wells E. N., Cohen A. J., Hodge E. Analyses of optical coatings on Apollo fines.— *J. Geophys. Res.*, in press.
4. Birkebak R. C., Cremers C. J., Dawson J. P. Spectral directional reflectance of lunar fines as a function of bulk density.— *Proc. Second Lunar Sci. Conf.*, 1971, 3, 21—97.
5. Garlick G. F. J., Lamb W. E., Steigmann G. A., Geake J. E. Thermoluminescence of lunar samples and terrestrial plagioclases.— *Proc. Second Lunar Sci. Conf.*, 1971, 3, 2277.
6. Nash D. B., Conel J. E. Luminescence and reflectance of Apollo 12 samples.— *Proc. Second Lunar Sci. Conf.*, 1971, 3, 2235.
7. Бершов Л. В., Борсук А. М., Виноградов В. И., Кондаков А. А., Чернышев И. В. Вещество Луны по материалам «Аполлон-11».— *ВИНИТИ, серия Итоги науки. Геохимия, минералогия, петрография*, 1971, 150.
8. Gold T., Campbell M. J., O'Leary B. T. Optical and high-frequency electrical properties of the lunar samples.— *Science*, 1970, 167, 707.
9. Hapke B. W. Lunar surface. Composition inferred from optical properties.— *Science*, 1968, 159, 76.

Ордена Ленина Институт геохимии и аналитической химии
им. В. И. Вернадского АН СССР

Институт космических исследований АН СССР,
Москва